

Research on the biochar disc granulation process

Badanie procesu granulacji talerzowej biowęgla



DOI: 10.15199/62.2026.8.3

Biochar was granulated with the addn. of bentonite and water or 50% molasses soln., used in various proportions. The granulation process was carried out using a disc granulator with a disc diam. of 300 mm, an axis angle of inclination of 45 degrees, and a disc rotational speed of 20 rpm. Two of the 10 granulation expts. were supplemented with a pulverization operation, which was conducted immediately after granulation. It was demonstrated that as the bentonite content in the granulated bed increased, the efficiency of the granulation process and the size of the granules increased. Pressureless granulation of biochar enabled the valorization of the biochar into a useful granulate form.

Keywords: beet molasses, biochar, granulation

Biowęgiel granulowano z dodatkiem bentonitu i wody lub 50-proc. roztworu melasy, stosowanych w różnych proporcjach. Proces granulacji przeprowadzono za pomocą granulatora tarczowego o średnicy tarczy 300 mm, kącie nachylenia osi 45° i prędkości obrotowej tarczy 20 rpm. Dwa z 10 eksperymentów granulacyjnych uzupełniono o operację pulweryzacji, którą przeprowadzono bezpośrednio po granulacji. Wykazano, że wraz ze wzrostem zawartości bentonitu w złożu granulowanym zwiększała się wydajność procesu granulacji i rozmiar granulek. Bezciśnieniowa granulacja biowęgla umożliwiła jego waloryzację do postaci użytecznego granulatu.

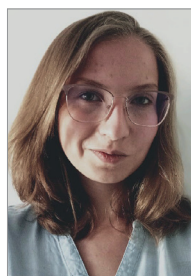
Słowa kluczowe: melasa buraczana, węgiel aktywny, granulacja

Jednym z największych problemów związanych z ochroną środowiska jest zanieczyszczenie gleb i ich ubożenie w niezbędne składniki, zwłaszcza organiczne. Rozwiązaniem tego problemu może być suplementowanie gleby za pomocą biowęgla. Szerokie zastosowanie biowęgla w energetyce oraz rolnictwie sprawia, że jest to temat wielu badań naukowych mających na celu wdrożenie rozwiązań bazujących na biowęgla do warunków przemysłowych¹⁻⁴). Dotychczasowe badania wskazują na wysoką skuteczność biowęgla jako preparatów poprawiających właściwości gleby. Pozwalają na usuwanie zanieczyszczeń, metali ciężkich, a także na zatrzymywanie wody oraz składników odżywczych. Jest to zatem efektywny sposób remediacji gleb. Zastosowanie biowęgla wymaga jednak przekształcenia substratu w formę dogodną do stosowania w rolnictwie, np. granulki. Granulacja materiału pozwala zabezpieczyć substrat przed pyleniem, a także ułatwia jego magazynowanie i dozowanie⁵⁻⁷).

Biowęgiel to materiał otrzymywany w procesie pirolizy lub toryfikacji biomasy, który pod względem struktury

i właściwości wykazuje podobieństwo do węgla drzewnego. Zgodnie z definicją International Biochar Initiative biowęgiel to *drobnoziarnisty karbonizat o wysokiej zawartości węgla i niskiej podatności na rozkład*. Pierwszy człon nazwy, „bio” wskazuje na biologiczne pochodzenie substratów użytych do jego produkcji. Substraty do produkcji biowęgla obejmują zróżnicowane grupy materiałów. Należą do nich rośliny energetyczne, biomasa rolnicza, odpady leśne, osady ściekowe, organiczna frakcja odpadów komunalnych i pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego. Biowęgiel może również być otrzymywany z innych odpadów generowanych w gospodarstwach rolnych. Wybór odpowiednich substratów procesu produkcji biowęgla zależy od wielu czynników, wśród których należy wyróżnić: aspekty logistyczne, właściwości danej biomasy, pożądane właściwości produktu oraz warunki procesu pirolizy.

Piroliza należy do najstarszych procesów termicznej konwersji biomasy i wywodzi się z procesu prażenia kawy. Prowadzona jest w warunkach beztlenowych w temp.



Mgr inż. Beata KOBACKA ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Zdobywczyni licznych nagród i wyróżnień, w tym: nagrody za najlepszy poster na międzynarodowej konferencji TCCB 2024 oraz nagrody głównej podczas Akademickich Mistrzostw Menedżerskich (AMM) Carpathian Startup Fest w Jasionce k. Rzeszowa w 2025 r. Specjalność – granulacja, toryfikacja i odnawialne źródła energii.



Dr hab. inż. Szymon SZUFA, prof. PŁ (ORCID: 0000-0002-7287-0553), w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej na kierunku energetyka ze specjalnością energetyka ze źródeł odnawialnych. W 2005 i 2006 r. odbył roczne studia magisterskie w ramach programu Erasmus na Politechnice Delft. W 2014 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. Był stypendystą Ministra Nauki, a także Stypendiów im. Mieczysława Bekkera oraz Marie Skłodowska-Curie Postdoctoral Fellowship. Od 2025 r. jest profesorem uczelni w grupie pracowników badawczych, a od 2023 r. koordynatorem międzynarodowego konsorcjum projektu Marie Skłodowska-Curie Staff Exchange o akronimie BioTrainValue na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Specjalność – toryfikacja biomasy z wykorzystaniem pary, wytwarzanie zielonego wodoru.

*** Adres do korespondencji:**

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, tel.: +48 606-134-239, e-mail: szymon.szufa@p.lodz.pl

350–700°C. W procesie pirolizy oprócz biowęgla powstają również inne paliwa ciekłe i gazowe, takie jak olej popirolityczny i torgaz, gaz składający się w 90% z wody. Proporcje, w jakich występują poszczególne produkty zależą m.in. od temperatury i tempa jej przyrostu oraz ciśnienia. Największa zawartość biowęgla jest uzyskiwana w temp. 400–550°C, przy powolnym przyroście temperatury (0,01–2°C/s) oraz długim czasie przebywania.

Różnice w składzie biomasy oraz parametrach procesowych wpływają nie tylko na możliwość wytworzenia szkodliwych produktów ubocznych, ale także na bardzo duże zróżnicowanie uzyskanych biowęgla pod względem właściwości i składu chemicznego. Charakterystyczną właściwością biowęgla jest niewielka podatność na rozkład. Oznacza to, że po wprowadzeniu do gleby długo zachowują stały skład chemiczny. Ponadto do najważniejszych właściwości, które decydują o szerokim zastosowaniu biowęgla zalicza się porowatość, rozwiniętą strukturę wewnętrzną oraz pojemność jonowymienną. Zastosowanie wysokiej temperatury procesu pirolizy powoduje powstawanie wielu aktywnych grup funkcyjnych, które odpowiadają za reaktywność węgla z mineralną i organiczną częścią gleby⁸.

Na powierzchni biowęgla mogą występować zarówno obszary o odczynie kwasowym, jak i zasadowym. Materiał wykazuje jednak właściwości alkaliczne i zwiększa pH gleby, do której jest wprowadzany. To sprawia, że największa skuteczność działania biowęgla obserwowana jest w glebach silnie zakwaszonych⁹.

Istotną zaletą stosowania biowęgla jest ograniczanie ilości odpadów biodegradowalnych. Odpady biologiczne poddane pirolizie zmniejszają swoją objętość i masę, a ponadto zostają pozbawione patogenów. Wykorzystanie odpadów biodegradowalnych jako substratów do produkcji biowęgla pozwala na odzysk energii z odpadów, obniżenie kosztów transportu i zmniejszenie emisji metanu. Uzyskany w ten sposób biowęgiel najczęściej jest wykorzystywany w energetyce jako paliwo odnawialne. Może on stanowić alternatywę dla paliw kopalnych, gdyż wartość opałowa niektórych biowęgla, np. z rzepaku lub drewna czereśniowego, przewyższa wartość opałową węgla brunatnego oraz jest zbliżona do wartości dla węgla kamiennego.

Wprowadzanie biowęgla do gleby zwiększa jej żyzność i produktywność, a także wspomaga działanie nawozów mineralnych. Wynika to przede wszystkim z porowatej struktury, która umożliwia retencję wody. Obecność biowęgla w glebie pozwala także na retencję składników odżywczych

dzięki zawartym w nim grupom funkcyjnym o właściwościach jonowymiennych. Biowęgle mogą również wiązać zanieczyszczenia i metale ciężkie, co ogranicza ich dostępność dla organizmów żywych^{8,9}. Efekt wiązania metali ciężkich jest zależny głównie od rodzaju gleby i jej pH¹⁰.

Podsumowując, toryfikaty stosowane są więc jako paliwa alternatywne¹¹, dodatki do nawozów, ale również jako dodatki skracające czas wytwarzania biogazu podczas fermentacji^{12–14}.

Mimo wielu pozytywnych właściwości i potencjalnych zastosowań, stosowanie biowęgla w większości krajów nadal nie jest uregulowane prawnie. Problem stanowi sama definicja biowęgla. Pomimo występowania licznych definicji w literaturze, żadna z nich nie jest oparta na regulacjach prawnych. Powoduje to, że biowęgiel nie został jednoznacznie zakwalifikowany do żadnej z kategorii: produkt, produkt uboczny lub odpad. Biowęgiel otrzymywany z odpadów biodegradowalnych może być w potocznym rozumieniu odpadem i podlegać art. 3.1. dyrektywy¹⁵ oraz art. 3.1. ustawy¹⁶. Jednak powołując się na art. 10 ustawy¹⁶, biowęgiel może zostać uznany za produkt uboczny. Inny przypadek stanowi biowęgiel otrzymywany z uprawy specjalnie na ten cel. Jest on wtedy w świetle prawa produktem procesu. O statusie biowęgla decyduje zatem rodzaj substratu użytego do produkcji, cel procesu konwersji oraz zastosowanie uzyskanego produktu.

Aby zapewnić odpowiednią jakość produktu oraz bezpieczeństwo jego stosowania, niezbędne jest opracowanie standardów oceny biowęgla. Jeden z nich, stworzony przez Delinat Institute, obejmuje zalecenia dotyczące m.in. rodzaju substratów, przebiegu procesu oraz parametrów produktu. Spełnienie tych wymagań pozwala na uzyskanie Europejskiego Certyfikatu Biowęgla¹⁷.

Obecnie stosowanie biowęgla w rolnictwie nie jest jednoznacznie uregulowane prawnie na terenie Unii Europejskiej. W Polsce stosowanie biowęgla jako nawozu podlega ustawie¹⁸ oraz rozporządzeniu¹⁹. Na ich podstawie dopuszczenie biowęgla do obrotu wymaga rejestracji i uzyskania zgody ministra rolnictwa i rozwoju wsi. Powyższe regulacje nie dotyczą nawozu w ilościach badawczych²⁰.

Poza zastosowaniem rolniczym biowęgle podległe procesowi toryfikacji, a następnie granulacji mogą również zostać wykorzystywane w procesie współpalania z węglem w elektrowniach węglowych^{21–25}.

Celem pracy była weryfikacja możliwości granulacji biowęgla oraz określenie wpływu poszczególnych parametrów



Mgr inż. Piotr PIERSA (ORCID: 0000-0001-5480-9372) jest doktorantem w dziedzinie inżynierii środowiska w kierunku „Inżynieria chemiczna w ochronie środowiska” na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Równocześnie jest prezesem APS-Ekoinnowacje sp. z o.o. działającej na styku nauki i biznesu, która komercjalizuje i uynkawia nowatorskie technologie i ekoprodukty. Specjalność – energetyka odnawialna, efektywność energetyczna procesów wytwórczych oraz zagospodarowanie i przetwarzanie odpadów biomasy, w szczególności w zakresie aglomeracji produktów powstających w procesie toryfikacji biomasy parą przegrzaną.



Dr hab. inż. Remigiusz MODRZEWSKI (ORCID: 0000-0002-8653-0293) w roku 1994 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. W 2000 r. uzyskał stopień doktora nauk chemicznych na tym samym wydziale. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej. Specjalność – modelowanie procesu przesiewania materiałów ziarnistych oraz projektowanie i budowa przesiewaczy przemysłowych.

aglomeracji przesypowej biowęgla na przebieg procesu oraz charakterystykę uzyskanego produktu.

Część doświadczalna

Materiały

W badaniach wykorzystano węgiel aktywny z łupin orzecha, o wielkości ziaren z przedziału 0,4–1,7 mm. Jako materiał mineralny stosowano bentonit o średnim rozmiarze ziarna 0,2 mm. Wilgotność magazynowanego syckiego bentonitu wynosiła 9%. Jako ciecz nawilżającą stosowano wodę lub 50-proc. roztwór wodny melasy buraczanej. Dodatek w postaci bentonitu poprawia właściwości granulatu²⁶⁾ i stanowi dodatkowy składnik nawozowy. Bentonit to naturalna glinka (głównie montmorylonit), używana jako polepszacz struktury gleb piaszczystych, zwiększający ich zdolność do zatrzymywania wody i składników odżywczych.

Metodyka badań

Proces granulacji przeprowadzono w zaprojektowanym i wykonanym na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej granulatorze talerzowym o średnicy talerza $D = 300$ mm i wysokości obrzeża $h = 75$ mm. Podczas badań granulowane złożo nawilżano za pomocą dyszy hydraulicznej.

Surowiec (biowęgiel) granulowano z udziałem bentonitu oraz cieczy wiążącej, odpowiednio wody lub wodnego roztworu melasy. Konieczność dodatku składnika mineralnego wynikała z nieudanych prób granulacji biowęgla (badania wstępne) bez dodatku bentonitu. Ze względu na to, że brak jest danych literaturowych dotyczących bezciśnieniowej granulacji biowęgla, a próby wstępne wskazały na potrzebę stosowania cieczy wiążącej lub spoiwa w postaci materiału mineralnego, podczas badań postanowiono prześledzić wpływ dodatku bentonitu w różnych proporcjach masowych oraz zastosowano 50-proc. wodny roztwór melasy. Wykonano 10 prób różniących się pomiędzy sobą m.in. sposobem nawilżania, stosunkiem masowym bentonitu do węgla i rodzajem cieczy wiążącej. W wypadku prób 5. i 6. proces w końcowym etapie trwania uzupełniono o zabieg pudrowania polegający na dostarczeniu suchego surowca na przesypujące się w granulatorze aglomeraty w celu eliminacji możliwości ich sklejanie.

W trakcie badań zastosowano stały kąt nachylenia talerza granulatora talerzowego równy 45° . Prędkość obrotowa

talerza wynosiła 20 rpm. Czas prowadzenia procesu wynosił 10–15 min. W trakcie granulacji materiał był zwilżany za pomocą wody lub 50-proc. wodnego roztworu melasy. W badaniach ciecz dostarczano do złoża za pomocą dyszy zraszających. W próbach, w których czas nawilżania był równy czasowi granulacji, nawilżanie zdefiniowano jako ciągłe, a w przypadku gdy czas nawilżania był krótszy od czasu granulacji, nawilżanie nazwano okresowym. Wszystkie uzyskane w procesie granulki ważono i poddano suszeniu w temp. 75°C przez 24 h. Po wysuszeniu produktu ponownie określano jego masę. Wyznaczony w ten sposób ubytek masy stanowił podstawę do określenia wilgotności produktu po granulacji. Następnie wysuszony produkt poddano analizie sitowej.

Materiał zebrany na dnie zestawu sit, czyli produkt o rozmiarze poniżej 2 mm, składał się głównie z nielicznych niezgranulowanych ziaren biowęgla, pozostałości bentonitu oraz najmniejszych zarodków granulek. Ze względu na skład ziarnowy surowca, w którym występowały ziarna biowęgla o rozmiarze do 1,7 mm, uznano, że podczas dalszej analizy wyników granulowany produkt charakteryzował się wielkością ≥ 2 mm. Zwiększenie rozmiaru akceptowalnych granulatów do wielkości powyżej 1 mm w sposób oczywisty „poprawiłoby” wyniki, ale wiązałoby się z koniecznością uznania jako aglomeraty również niezgranulowane ziarna torfikatu o wielkości ziarna z zakresu 1–2 mm. Parametry przeprowadzonych prób przedstawiono w tabeli 1.

Wyniki badań

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe granulaty uzyskane w próbach P1.5, P1.7 i P1.8. Widoczne były czarne wtrącenia w granulacie, co świadczy o tym, że granule te tworzył biowęgiel i bentonit. Najlepsze rezultaty spośród prezentowanych na zdjęciach prób uzyskano w próbie P1.8. Granulki te miały ciemne, szarobrazowe zabarwienie. Wykazywały dostateczną wytrzymałość, nie ulegały zniszczeniu podczas przesypywania i analizy sitowej. W próbce zaobserwowano niewielką ilość niezgranulowanego materiału. Wilgotność granulatu wyniosła 29,0%. Wilgotności końcowe uzyskanych w poszczególnych próbach granulatów przedstawiono w tabeli 2. Frakcje 2–8 mm stanowiły 80% całości produktu. Wynik ten można uznać za bardzo dobry, zwłaszcza, że jako podziarno uznano frakcję do 2 mm, w skład której wchodziły również aglomeraty



Prof. dr hab. inż. Tomasz P. OLEJNIK (ORCID: 0000-0001-6941-4111) w roku 1987 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. W 1999 r. uzyskał stopień doktora, a w 2014 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska tej samej uczelni. Tytuł profesora otrzymał w 2023 r. Obecnie pracuje na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PŁ, gdzie jest kierownikiem katedry i pełni funkcję prodziekana ds. rozwoju. Specjalność – inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.



Dr hab. inż. Andrzej OBRANIAK prof. PŁ (ORCID: 0000-0003-0589-9679), w roku 1989 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. W 2002 r. uzyskał stopień doktora, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska tej samej uczelni, gdzie obecnie pracuje jako profesor uczelni w Katedrze Aparatury Procesowej. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa, mechanika.

**** Adres do korespondencji:**

e-mail: andrzej.obraniak@p.lodz.pl, tel.: +48 691-201-464

Table 1. Values of process parameters corresponding to individual points of the experiment plan

Tabela 1. Wartości parametrów procesowych odpowiadające poszczególnym punktom planu eksperymentu

Parametr	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P1.5	P1.6	P1.7	P1.8	P1.9	P1.10
Masa bentonitu, g	150	150	150	150	225	225	225	225	200	240
Masa węgla, g	75	75	75	75	75	75	75	75	100	60
Stosunek masowy bentonit/węgiel	2:1	2:1	2:1	2:1	3:1	3:1	3:1	3:1	2:1	4:1
Stężenie roztworu melasy, %	50	0	0	50	0	50	0	50	50	50
Objętość cieczy nawilżającej, cm ³	85	100	100	85	150	128	150	128	128	128
Masa cieczy nawilżającej, g	100	100	100	100	150	150	150	150	150	150
Stosunek masowy cieczy do suchego substratu	0,44	0,44	0,44	0,44	0,50	0,50	0,50	0,5	0,50	0,50
Sposób nawilżania	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C
Pudrowanie	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Czas granulacji, min	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15
Czas nawilżania, min	2,5	2,5	10	10	15	15	15	15	15	15



Fig. 1. Granulate obtained in tests P1.5, P1.7, P1.8

Rys. 1. Granulat uzyskany w próbach P1.5, P1.7, P1.8

o wielkości do 2 mm oraz aglomeraty do 10 mm, które również w wielu wypadkach traktuje się jako frakcje handlową. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość granulacji biowęgla, ale jedynie przy dodaniu do przetwarzanego złoża składnika mineralnego. Fakt ten nie dyskwalifikuje proponowanej metody granulacji, ponieważ pozwala ona komponować granulowany nawóz o różnym składzie chemicznym, ale zawierający węgiel w formie dobrze przyswajalnej przez glebę. W pracy poza udowodnieniem możliwości wytwarzania granulatów zawierających biowęgiel przedstawiono również wpływ zmienianych parametrów na uzyskany produkt, tzn. wpływ rodzaju nawilżania i cieczy nawilżającej, proporcji masowych obu przetwarzanych substratów oraz stosowanie operacji pudrowania nawilżonego granulatu.

Wpływ sposobu nawilżania

Na rys. 2 przedstawiono porównanie składów ziarnowych uzyskanych granulatów w próbach różniących się jedynie

sposobem nawilżania. Zaprezentowane wyniki wskazują na mniejszą masę niezgranulowanego materiału dla próby z nawilżaniem ciągłym. Frakcja 0–2 mm była jednak dominująca dla obu prób, co świadczyło o małej efektywności procesu. Produkt otrzymany w procesie z nawilżaniem ciągłym wykazywał mniejszą zawartość granul o rozmiarach poniżej 2 mm. Porównanie mas zgranulowanego materiału pozwala stwierdzić, że próba P1.3 (nawilżanie ciągłe) wykazywała nieznacznie większą efektywność. Potwierdzeniem tego wniosku są analogiczne wyniki uzyskane dla prób P1.1 oraz P1.4, w których porównano wpływ rodzaju nawilżania w przypadku dostarczania do granulatora jako cieczy 50-proc. roztworu melasy. Wyniki badań wskazują na wyższą efektywność procesu granulacji przy nawilżaniu złoża w sposób ciągły. Różnice te są jednak zależne od rodzaju cieczy wiążącej. Przewagę nawilżania ciągłego obserwowano w większym stopniu dla granulacji z użyciem roztworu melasy.

Wpływ rodzaju cieczy wiążącej

Analiza wyników była inspiracją do porównania efektów granulacji uzyskanych dla prób różniących się zastosowaną cieczą zwilżającą. Próby P1.7 oraz P1.8 zostały przeprowadzone z użyciem odpowiednio wody i wodnego roztworu melasy, czyli z użyciem różnych cieczy wiążących. Cechą charakterystyczną danego zestawienia było nawilżanie w sposób ciągły oraz stosunek masy bentonitu i węgla wynoszący 3:1. Wykres obrazujący zmiany składu granulometrycznego zamieszczony na rys. 3 wskazuje na mniejszą zawartość niezgranulowanego materiału dla próby zwilżanej 50-proc. roztworem melasy i zdecydowanie większe masy materiału zgranulowanego (zwłaszcza dla najbardziej pożądanych frakcji 2–6,3 mm), co przekłada się na więk-

Table 2. Final moisture content of the granulates corresponding to individual points of the experimental plan

Tabela 2. Wilgotność końcowa granulatu odpowiadająca poszczególnym punktom planu eksperymentu

Punkt	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P1.5	P1.6	P1.7	P1.8	P1.9	P1.10
Wilgotność końcowa granulatu	0,3	0,49	0,56	0,44	0,60	0,34	0,46	0,29	0,32	0,35

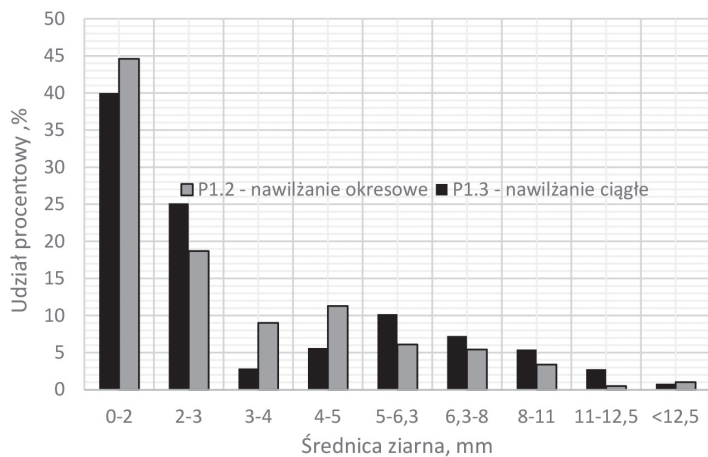


Fig. 2. Effect of the wetting method (granulates obtained in tests P1.2 and P1.3) on the granulometric composition of the granulates

Rys. 2. Wpływ sposobu nawilżania (granulaty uzyskane w próbach P1.2 i P1.3) na skład granulometryczny granulatów

szą efektywność procesu. Wyniki zamieszczone w formie graficznej na rys. 4 wskazują na mniejszą zawartość niezgranulowanego materiału dla próby zwilżanej 50-proc. roztworem melasy. W obu próbach frakcje dominujące należały do średnic powyżej 2 mm, co świadczy o wysokiej efektywności procesu. Produkt otrzymany w procesie z nawilżaniem roztworem melasy wykazywał większą zawartość granułów o rozmiarach 2–6,3 mm. Produkt powstały w procesie z nawilżaniem wodą wykazywał większą zawartość ziaren o średnicach 6,3–11 mm. Efektywność procesu granulacji przy nawilżaniu złoża z wykorzystaniem 50-proc. roztworu melasy była większa, na co wskazuje próba P1.8. Warto jednak zaznaczyć, że dla prób z procesem pudrowania (próby P1.5 oraz P1.6) lub z nawilżaniem okresowym, różnice te były mniej znaczące. W przypadku nawilżania materiału sypkiego wodą, w odróżnieniu od przypadku gdy stosowano melasę, za połączenia pomiędzy lepiszczem a cząstkami materiału stałego odpowiadały głównie siły adhezji oraz mostki stałe wynikające z rozpuszczania się niektórych składników minerału (np. ility). Podczas stosowania roztworów melasy zasadniczą rolę odgrywały siły lepkości. Zwiększona wydajność procesu z użyciem melasy wynikała zatem z dużej lepkości cieczy, która była dodatkowym lepiszczem scalającym ziarna surowca.

Porównanie wyników otrzymanych dla prób bez pudrowania i z nawilżaniem ciągłym wykazuje tendencję do wytwarzania większych granułów w obecności wody, natomiast mniejszych w obecności melasy. Dla prób z nawilżaniem okresowym tendencja ta była przeciwna, przy pudrowaniu zaś rodzaj cieczy wiążącej nie wykazywał większego wpływu na rozmiar granulek.

Wpływ stosunku masowego bentonitu do węgla

Zastosowanie w procesie granulacji bentonitu, materiału, który po nawilżeniu generuje powstawanie mostków stałych, skłoniło do analizy wpływu zmian masy dodanego surowca mineralnego w stosunku do masy biowęgla na

uzyskany efekt granulacji. Podczas badań wykonano próby różniące się wartością stosunku masy węgla i masy bentonitu. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie na rys. 5, który obrazuje porównanie udziałów masowych dla prób P1.8–P1.10.

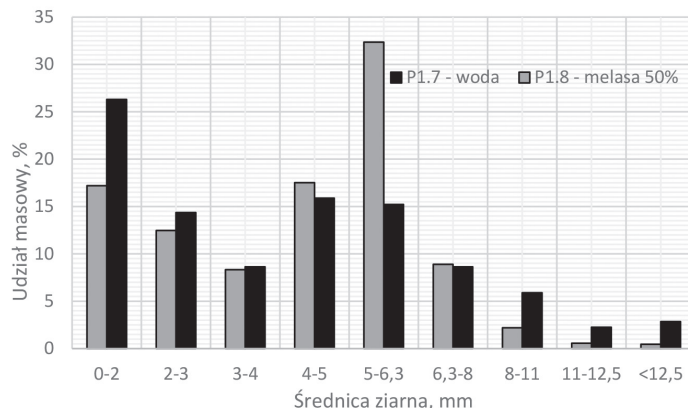


Fig. 3. Comparison of the particle size distribution of granulates obtained in tests P1.7 and P1.8 (effect of humidification type)

Rys. 3. Porównanie składu granulometrycznego granulatów uzyskanych w próbach P1.7 i P1.8 (wpływ rodzaju nawilżania)

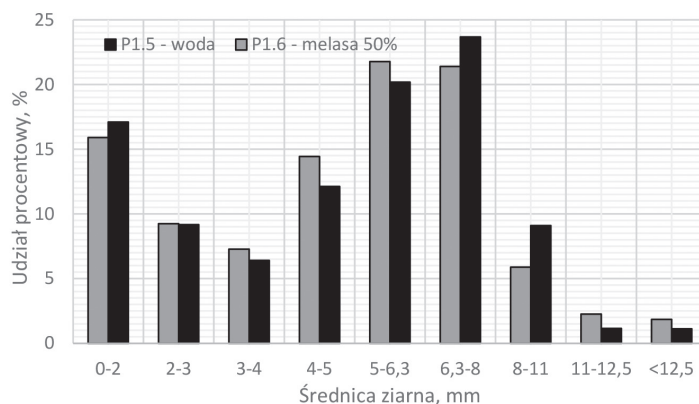


Fig. 4. Effect of the type of liquid (granulates obtained in tests P1.5 and P1.6) on the granulometric composition of the granulates

Rys. 4. Wpływ rodzaju cieczy (granulaty uzyskane w próbach P1.5 i P1.6) na skład granulometryczny granulatów

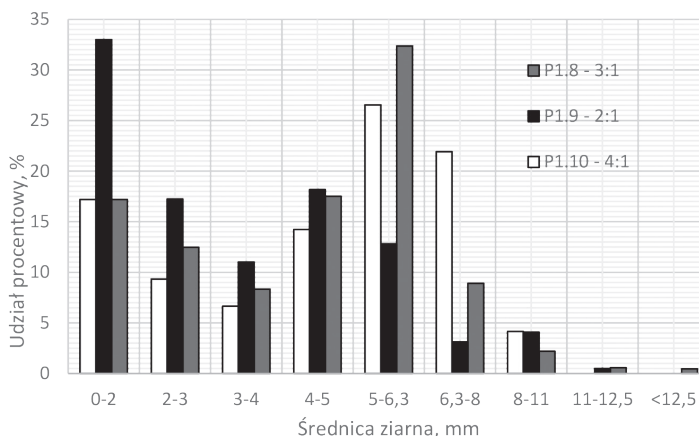


Fig. 5. Effect of the bentonite-to-coal mass ratio (granulates obtained in tests P1.8, P1.9, and P1.10) on the particle size distribution of the granulates

Rys. 5. Wpływ stosunku masy bentonitu do masy węgla (granulaty uzyskane w próbach P1.8 i P1.9 i P1.10) na skład granulometryczny granulatów

Próby granulacji P1.8–P1.10 zostały wykonane dla różnych proporcji masowych substratów suchych. Granulat przetwarzany w poszczególnych eksperymentach był zwilżany w sposób ciągły 50-proc. wodnym roztworem melasy. Wykres składu granulometrycznego wskazuje na widocznie większą zawartość niezgranulowanego materiału w próbie P1.9, w której wspomniany stosunek mas wynosił jak 2:1. Ponadto, dla tej próby frakcja 0–2 mm była dominująca, co świadczy o małej efektywności procesu. Dla prób P1.8 oraz P1.10, w których zwiększono masę bentonitu (stosunek 3:1 i 4:1) dominowała frakcja 5–6,3 mm. Wyniki dotyczące pozostałości niezgranulowanego materiału wskazują, że próba P1.9 (stosunek 2:1) miała zdecydowanie najniższą efektywność (33,0% materiału nie uległo zgranulowaniu w ogóle lub w stopniu niewystarczającym). Dla prób P1.8 oraz P1.10 wartość ta była taka sama i wynosiła 17,2%. Zestawienie to dowodzi, że wraz ze wzrostem zawartości bentonitu, wzrastała efektywność procesu oraz wielkość granulek. Wynikało to zarówno z właściwości poszczególnych substratów, takich jak zwilżalność, jak i z ich struktury oraz wielkości cząstek. Większe rozdrobnienie materiału powodowało zwiększenie powierzchni kontaktu z fazą ciekłą, którą stanowiło lepiszcze. Bentonit użyty w badaniu miał postać sferoidalnego proszku o wielkości cząstek ok. 0,2 mm, biowęgiel zaś pelletu o walcowatym kształcie i o rozmiarze ziarna dochodzącym do 1,7 mm. Niewielki rozmiar cząstek bentonitu i jego lepsza zdolność do granulacji sprawiały, że zwiększenie jego udziału masowego poprawiało efektywność procesu. Warto jednak zauważyć, że zwiększanie udziału masowego bentonitu, a więc zmniejszanie udziału węgla, obniżało wartość użytkową produktu. Mimo że wzrastała efektywność produkcji, zawartość biowęgla w nawozie zmniejszała się. Należy zatem w kolejnych badaniach wyznaczyć optymalne stosunki masowe oraz stężenie roztworu melasy, które zapewnią jednocześnie wysoką zawartość biowęgla w nawozie, jak i wysoką skuteczność procesu.

Wpływ procesu pudrowania

Kolejnym analizowanym w pracy parametrem, którego wpływ na granulację biowęgla określono podczas badań było zastosowanie dodatkowej operacji pudrowania. Wpływ pudrowania określono zarówno dla prób wykonanych podczas nawilżania wodą, jak i wodnym roztworem melasy. Próby P1.5 oraz P1.7 wykonano z użyciem wody. W próbie P1.7 (bez pudrowania) cały substrat został dodany do granulatora przed rozpoczęciem procesu, natomiast w próbie P1.5 (z pudrowaniem) część materiału sypkiego została dodana w trakcie granulacji, po przewilżeniu złoża.

Dla próby bez pudrowania uzyskano większą zawartość niezgranulowanego materiału. Dla tej próby frakcja 0–2 mm była dominująca. Produkt otrzymany w procesie z pudrowaniem charakteryzował się większym udziałem frakcji o rozmiarach 5–11 mm. Granulki powstałe w procesie bez pudrowania wykazywały większą zawartość ziaren

o średnicach 2–5 mm oraz powyżej 11 mm. Wyniki dotyczące podziarna wskazują, że próba P1.5 (z pudrowaniem) wykazywała większą efektywność. Analogiczne wyniki uzyskano dla prób P1.6 oraz P1.8, które przeprowadzono za pomocą roztworu melasy. W próbie P1.8 (bez pudrowania) cały substrat został dodany do granulatora przed rozpoczęciem procesu, natomiast w próbie P1.6 (z pudrowaniem) część materiału sypkiego została dodana w trakcie granulacji, po przewilżeniu złoża. Uzyskane wyniki wskazują na nieznacznie mniejszą zawartość niezgranulowanego materiału w próbie z pudrowaniem. Podziarno (< 2 mm) stanowiło w każdej z prób mniej liczną frakcję niż granulki właściwe. Świadczy to o wysokiej efektywności procesu. Produkt otrzymany w procesie z pudrowaniem wykazywał większą zawartość granul o rozmiarach powyżej 6,3 mm i mniejszą masę podziarna.

Uzyskane wyniki wskazują więc na większą efektywność procesu z zastosowaniem operacji pudrowania w trakcie granulacji. Ponadto wykazano, że rozmiar granul wytwarzanych z wykorzystaniem operacji pudrowania był większy niż dla analogicznych prób, dla których cały materiał został dodany do aparatu na początku procesu. Wynika to z mechanizmu tworzenia granulatu polegającym na otaczaniu. Granulki przesypujące się w złożu kontaktowały się z niezgranulowanym materiałem podczas przetwarzania w dół talerza. Wilgotna powierzchnia granulki pozwalała na dołączenie drobnych cząstek, co prowadziło do otaczania ziarna substratem i przyrostu jego średnicy. Zderzenia poszczególnych mikroziaren miały charakter losowy, a obecność siły odśrodkowej w układzie rozdzielała poszczególne frakcje. Wprowadzenie drobin substratu bezpośrednio na uprzednio ukształtowane i przewilżone granulki sprzyjało ich otaczaniu, przez co znacząco zwiększało rozmiary granul.

Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki badań wskazują na większą efektywność procesu granulacji przy nawilżaniu złoża w sposób ciągły. Różnice te są jednak zależne od rodzaju cieczy wiążącej. Przewagę nawilżania ciągłego obserwowano w większym stopniu dla granulacji z użyciem roztworu melasy.

Porównanie wyników otrzymanych dla prób bez pudrowania i z zastosowaniem nawilżania ciągłego wykazują tendencję do wytwarzania większych granul przy zastosowaniu wody, natomiast mniejszych przy nawilżaniu za pomocą roztworu melasy. Dla prób z nawilżaniem okresowym tendencja ta jest przeciwna.

Podczas prób, w których stosowano pudrowanie przewilżonego granulatu rodzaj cieczy wiążącej nie wykazuje większego wpływu na rozmiar granulek.

Wraz ze wzrostem zawartości bentonitu w granulowanym złożu rośnie efektywność procesu granulowania oraz wielkość granulek. Wynika to zarówno z właściwości

poszczególnych substratów (np. zwilżalność), jak i z ich struktury i wielkości cząstek surowców.

Uzyskane wyniki wskazują na wyższą efektywność procesu granulacji uzupełnionego o operację pudrowania.

Publikacja ta powstała i została sfinansowana w ramach projektu BioTrainValue finansowanego przez Unię Europejską (Nr. 101086411) HORIZON-TMA-MSCA-Staff Exchange 2021 pt. "Biomass Valorisation via Superheated Steam Torrefaction, Pyrolysis, Gasification Amplified by Multidisciplinary Researchers Training for Multiple Energy and Products' Added Values".

Otrzymano: 12-06-2026

Zrecenzowano: 22-06-2026

Zaakceptowano: 29-06-2026

Opublikowano: 18-08-2026

LITERATURA

- [1] H. Unyay, P. Piersa, N.A. Perendeci, G. Wielgosinski, S. Szufa, *Int. J. Green Energy* 2024, **21**, nr 8, 1928.
- [2] Z. Romanowska-Duda, K. Piotrowski, S. Szufa i in., *Sci. Rep.* 2023, **13**, 16533
- [3] K. Ławińska, S. Szufa, R. Modrzewski, A. Obraniak, T. Wężyk, A. Rostocki, T.P. Olejnik, *Molecules* 2020, **25**, nr 22, 5419.
- [4] M. Marczak-Grzesik, P. Piersa, M. Karczewski, S. Szufa, H. Ünyay, A. Bochenek, P. Kędzierska-Sar, *Energies* 2021, **14**, nr 21, 7101.
- [5] R. Siuda, J. Kwiatek, S. Szufa, A. Obraniak, P. Piersa, L. Adrian, R. Modrzewski, K. Lawinska, K. Siczek, T.P. Olejnik, *Minerals* 2021, **11**, 2.
- [6] A. Obraniak, T. Gluba, *Physicochem. Probl. Miner. Proc.* 2011, **46**, 219.

- [7] A. Obraniak, T. Gluba, *Chem. Proc. Eng. – Inż. Chem. Proc.* 2012, **33**, 153.
- [8] K. Malińska, *Inż. Ochr. Środ.* 2012, **15**, nr 4, 387.
- [9] A. Medyńska-Juraszek, *Soil Sci. Ann.* 2016, **67**, nr 3, 151.
- [10] A. Medyńska-Juraszek, I. Ćwieląg-Piasecka, *Pol. J. Environ.* 2020, **29**, nr 2, 1749.
- [11] S. Szufa, *Przem. Chem.* 2020, **99**, nr 12, 1797.
- [12] E. Wrzeńska-Jędrusiak, M. Czarnecki, P. Kazimierski, P. Bandrów, S. Szufa, *Energies* 2023, **16**, nr 1, 564.
- [13] D. Kryszak, A. Bartoszewicz, S. Szufa, P. Piersa, A. Obraniak, T.P. Olejnik, *Processes* 2020, **8**, nr 11, 1489.
- [14] J. Stelmach, C. Kuncewicz, S. Szufa, T. Jirout, F. Rieger, *Processes* 2021, **9**, nr 1, 68.
- [15] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, *Dz.U. UE L* 312/3.
- [16] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, *Dz.U.* 2013, poz. 21.
- [17] EBC 2012–2025, European Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar, Carbon Standards International (CSI), Frick, Switzerland, <http://carbon-standards.com/ebc>.
- [18] Ustawa o nawozach i nawożeniu z 10 lipca 2007, *Dz.U.* z 2007, nr 147, poz. 1033.
- [19] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, *Dz.U.* z 2008 r. nr 119, poz. 765.
- [20] K. Malińska, *Inż. Ochr. Środ.* 2015, **18**, nr 3, 359.
- [21] M. Dzikuć, A. Piwowar, J. Adamczyk, S. Szufa, B. Likozar, M. Dzikuć, *Energy Rep.* 2026, **15**, 109383.
- [22] H. Unyay, A. Kostyniuk, S. Szufa, A. Lewandowski, B. Likozar, G. Wielgosiński, *Energy Conv. Manag.* 2026, **350**, 120974.
- [23] S. Szufa, H. Unyay, Z. Pakowski, P. Piersa, K. Siczek, Kabaciński, M. Siczek, S. Sobek, K. Moj, B. Likozar, A. Kostyniuk, R. Junga, *Renew. Energy* 2025, **239**, 122106.
- [24] S. Szufa, P. Piersa, R. Junga, A. Błaszczuk, N. Modliński, S. Sobek, M. Marczak-Grzesik, Ł. Adrian, M. Dzikuć, *Energy* 2023, **263**, Part E, 125918.
- [25] J. Ryšavý, J. Serenčíšová, J. Horáki in., *Biomass Conv. Bioref.* 2023, **13**, 16511.
- [26] A. Obraniak, T. Gluba, *Physicochem. Probl. Miner. Proc.* 2012, **48**, nr 1, 121.

POLSKA IZBA OPAKOWAŃ · V EDYCJA CYKLU OD 2019 R.

V Międzynarodowa Konferencja

MODERN PACKAGING

Dzień Opakowań 2026

Święto branżowe ustanowione przez Polską Izbę Opakowań w 2007 r.

Konferencja dedykowana **użytkownikom opakowań**: sieciom handlowym, firmom FMCG, zakładom produkcyjnym, co-packingowi i e-commerce.

PPWR · system kaucyjny i ROP · cyfrowy paszport produktu · finansowanie transformacji

Program i rejestracja: pio.org.pl/v-konferencja-modern-packaging/

biuro@pio.org.pl · +48 570 790 709 · www.pio.org.pl

V

edycja

15.09

2026

Warszawa

Warszawski Dom Technika NOT
ul. T. Czackiego 3/5